

# 基于改进 SA-WOA 算法优化热封刀 温度控制系统 PID 参数的研究

魏上云<sup>1,3</sup>, 马靖<sup>2,3</sup>, 胡晓兵<sup>1,3</sup>, 李虎<sup>1,3</sup>, 郭爽<sup>1,3</sup>, 章程军<sup>1,3</sup>

(1. 四川大学机械工程学院, 成都 610065; 2. 四川省宜宾普什集团  
有限公司技术中心, 宜宾 644007; 3. 四川大学宜宾园区, 宜宾 644000)

**摘要:** 套袋机热封刀温度通常采用 PID 算法进行控制, 但是 PID 控制参数大多由人为经验设定, 控制效果不佳. 为解决这一问题, 本文提出一种改进 SA-WOA 算法实现 PID 控制参数的自整定. 首先我们利用阶跃响应曲线法建立系统的传递函数模型, 再考虑鲸鱼算法以及模拟退火算法的优点, 将两者进行结合; 然后在此基础上对算法进行改进, 提高算法的收敛速度以及优化效果; 再将改进后的算法在 MATLAB R2017b 平台上进行仿真对比实验; 最后, 将仿真所得控制参数在套袋机上进行实验测试. 仿真对比结果表明, 相对于继电反馈算法、粒子群算法以及基于模拟退火的改进粒子群算法, 本文算法优化所得参数控制效果更好. 实测实验结果表明, 本文算法所得参数控制效果良好, 可以更好地满足实际的需求.

**关键词:** 套袋机; 热封温度; 改进 SA-WOA 算法; PID 控制

**中图分类号:** TB486 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2022.043001

## Research on PID parameters optimization of heat sealing knife temperature control system based on improved SA-WOA algorithm

WEI Shang-Yun<sup>1,3</sup>, MA Jing<sup>2,3</sup>, HU Xiao-Bing<sup>1,3</sup>, LI Hu<sup>1,3</sup>, GUO Shuang<sup>1,3</sup>, ZHANG Cheng-Jun<sup>1,3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;  
2. The Technology Center of Sichuan Yibin Pushi Group Company, LTD, Yibin 644007, China;  
3. Yibin R&D Park of Sichuan University, Yibin 644000, China)

**Abstract:** The temperature of the heat-sealing knife of the bagging machine is usually controlled by PID algorithm, but the control effect is not so good since the PID control parameters are mostly set by human experience. To solve this problem, an improved SA-WOA algorithm is proposed to realize the self-tuning of PID control parameters. First, the step response curve method is used to establish the transfer function model of the system, and then the advantages of the whale algorithm and the simulated annealing algorithm are considered, and the two are combined. On this basis, the algorithm is improved to improve the convergence speed and optimization effect of the algorithm. The improved algorithm is simulated and compared on the MATLAB R2017b platform. Finally, the control parameters obtained from the simulation are tested on the bagging machine. The simulation comparison results show that the parameter control effect obtained by the algorithm optimization in this paper is better compared with the relay feedback algorithm, the particle swarm algorithm and the improved particle swarm algorithm based

收稿日期: 2021-12-14

基金项目: 川大-宜宾校地合作项目(2019CDYB-13)

作者简介: 魏上云(1999-), 男, 四川宜宾人, 硕士研究生, 研究方向为智能控制, 工业机器人等. E-mail: 2522437898@qq.com

通讯作者: 马靖. E-mail: 1902979286@qq.com

on simulated annealing. The actual test results show that the parameter control effect obtained by the algorithm in this paper is good and can meet the actual demand.

**Keywords:** Bagging machine; Heat sealing temperature; Improved SA-WOA algorithm; PID control

## 1 引言

全自动套袋机是一种将具有热塑特性的薄膜通过热封刀加热裁切制成包装袋,并自动套装在产品上的机器<sup>[1]</sup>. 热封质量的好坏直接影响产品的后续加工. 热封质量与热封温度、热封压力以及热封时间相关联,其中热封温度对于热封质量的影响最大<sup>[2,3]</sup>,因此对热封温度控制的研究尤为重要.

目前温度控制最为普遍的方式为比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制, PID 控制是控制领域最成熟也最基础的控制方式<sup>[4]</sup>. 但是 PID 控制存在控制参数难以调节的缺点,控制参数直接影响 PID 控制的效果. 目前 PID 参数的设定大多通过人为经验选取,控制效果不理想. 西门子 S7-200 SMART PLC 中内置的 PID 模块采用继电反馈算法进行自整定寻优. 这种算法首先需要人为设定控制参数,让系统达到平衡,平衡之后,再给定系统一个微小的扰动,根据系统产生的变化计算出最优的控制参数<sup>[5]</sup>. 这种算法整定过程复杂,耗费时间过长,且寻优效果不理想. 文献[6,7]提出利用粒子群算法找寻最优 PID 控制参数,以满足实际控制需求. 但是粒子群算法计算量大,且有可能找到的是局部最优参数,导致控制效果不理想<sup>[8-10]</sup>. 鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA),是一种智能优化算法,相对于粒子群算法,鲸鱼算法的计算量更小,优化效果更好<sup>[11]</sup>. 但是鲸鱼算法也会有进入局部最优的情况存在<sup>[12]</sup>. 为了避免这一情况,人们考虑引入模拟退火算法(Simulated Annealing Algorithm, SA). 模拟退火算法是一种模拟温度降温过程而引出的算法,它可以有效地避免陷入局部最优<sup>[13]</sup>. 文献[14]提出了一种基于模拟退火的改进粒子群算法(Improved Particle Swarm Optimization Based on Simulated Annealing, SACPSO)对 PID 参数进行整定. 本文则将 SA 算法与 WOA 算法相结合,提出了一种改进的基于模拟退火的鲸鱼算法(Improved Whale Algorithm Based on Simulated Annealing Algorithm, SA-WOA). 该算法可以有效避免陷入局部最优. 我们在此基础上改进提升算法的计算效率,将改进后 SA-WOA 算法进行 PID 参数

自整定寻找最优 PID 参数,然后将所得参数应用到 PID 控制器上,实现对套袋机热封刀的温度控制.

## 2 全自动套袋机温度控制系统

本文对一款自研的 TD150 全自动套袋机进行研究. 全自动套袋机温度控制即是对套袋机的热封刀进行温度控制. 套袋机控制器采用西门子 S7-200 SMART 型号 PLC, K 型热电偶温度传感器采集热封刀的温度,西门子 PLC 的 EM AT04 模拟量输入模块将温度传感器的电压信号转换为数字信号,实时采集温度信息. PLC 普通数字量输出口进行 PWM 脉宽调制控制固态继电器,实现加热管不同功率的加热,完成对热封刀温度的精准控制. PLC 与 HMI 人机界面采用 RS485 串口通讯,可以实时读取温度传感器的信息,温度数据在界面上显示,可以更直观地检测温度是否到达设定值. PLC 与上位机之间采用 ISO-TCP 通讯<sup>[15]</sup>,上位机实时读取温度数据,通过温度数据的读取可以得到系统的模型,上位机进行参数自整定,将计算的参数传入 PLC 控制器. 整个控制系统如图 1 所示.

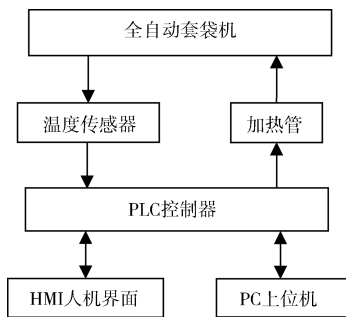


图 1 温度控制系统

Fig. 1 Temperature control system

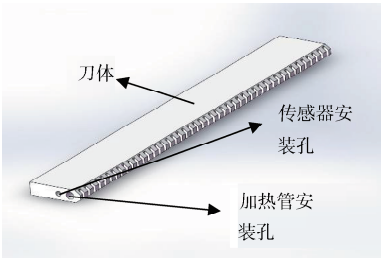
热封刀如图 2 所示,其中传感器安装孔用于安装 K 型热电偶传感器,加热管安装孔用于安装加热管,加热整个刀体,完成对薄膜的热封.

对于图 2 所示的热封刀模型,热封刀的热量获取是由加热管产生的热量减去通过刀体散发给环境的热量<sup>[16]</sup>,因此有如下公式.

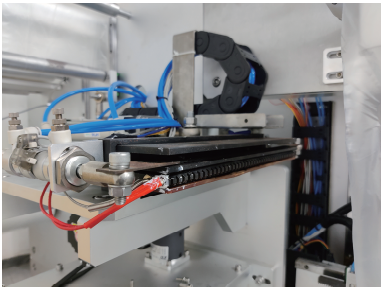
$$mc \frac{dT}{dt} + hS(T - T') = Q \quad (1)$$

式中,  $m$  为热封刀的质量;  $c$  为比热容;  $h$  为热封刀

表面传热系数; $S$  为热封刀与环境交换热量的总面积; $T$  为热封刀当前温度; $T'$  为环境当前温度; $Q$  为热封刀获取的热量.



(a) 热封刀三维模型



(b) 实际热封刀

图 2 热封刀  
Fig. 2 Heat sealing knife

为了对式(1)进行简化,我们通常在平衡点( $Q',U'$ )附近将整个热交换过程近似为线性过程,于是有

$$K_U=\frac{\Delta Q}{\Delta U} \tag{2}$$

将式(1)两边同时除以  $hS$  得:

$$t'\frac{d\Delta T}{dt}+\Delta T=K\Delta U \tag{3}$$

式中, $t'$ 、 $K$  均为常数; $\Delta T$  为热封刀当前温度与环境当前温度的差值.

因此式(3)为一个微分方程,对式(3)进行拉普拉斯变换,结果可得

$$G(s)=\frac{\Delta T(s)}{\Delta U(s)}=\frac{K}{1+t's} \tag{4}$$

结合实际生产过程,热量的传递过程是一个具有大惯性和大时滞性的过程. 因此对式(4)修正可得

$$G(s)=\frac{K}{1+t's}e^{-\tau s} \tag{5}$$

式中, $\tau$  为滞后时间.

根据文献[17]介绍,通过阶跃响应曲线法可以得出系统的传递函数. 于是我们给定系统一个 100%脉宽的输入,通过温度传感器以 0.5 s 的采

样周期采集温度数据,PLC 再将温度数据传递到上位机,根据数据得出系统在 1400 s 左右到达平衡. 通过 MATLAB 的 ident 工具箱识别出传递函数为

$$G(s)=\frac{4.26}{1+260.2s}e^{-5s} \tag{6}$$

式(6)中,拟合的传递函数与实测数据的拟合度为 94.84%,拟合度较高. 拟合曲线与实测数据曲线如图 3 所示.

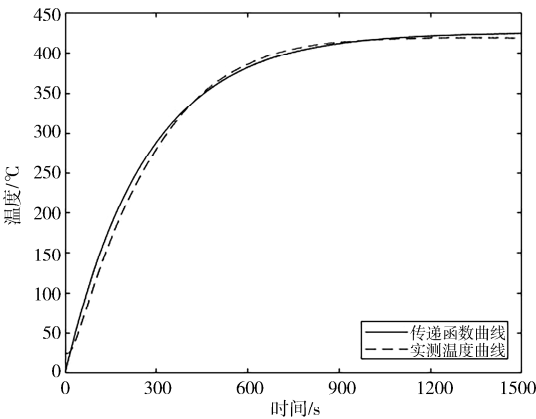


图 3 传递函数拟合曲线  
Fig. 3 Transfer function fitting curve

### 3 改进 SA-WOA 智能优化算法

#### 3.1 PID 算法

PID 算法的控制原理是将期望值与当前值做差得到误差量,对误差量进行比例、积分、微分运算可以得到一个控制量,将新的控制信号传递给系统进行控制,使实际值不断地接近期望值. 比例运算可以适当调整系统达到期望值的时间,比例过大会引起较大的超调,比例过小会导致达到稳态的时间过长. 积分运算可以消除系统的稳态误差. 微分运算可以提前预知系统超调,减小输出<sup>[18,19]</sup>. 一般情况下 PI 控制即可满足需求. 其控制如下式所示.

$$u(t)=K_P e(t)+K_I\int_0^t e(t)+K_D\frac{de(t)}{dt} \tag{7}$$

式中, $K_P$  为比例系数; $K_I$  为积分系数; $K_D$  为微分系数; $e(t)$  为  $t$  时刻的误差量.

因为实际生产中都是对数据进行离散采样,目前使用最广泛的是增量式 PID. 将式(7)进行离散化处理得到:

$$\Delta u(t)=K_P(e(t)-e(t-1))+K_I e(t)+K_D(e(t)-2e(t-1)+e(t-2)) \tag{8}$$

在实际控制系统中,更改  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  3 个参数

即可对系统进行控制,但是传统的 PID 算法中这 3 个参数是人为根据经验制订的,并不一定是最优的.因此传统的 PID 算法控制温度系统不是很精确.

### 3.2 鲸鱼算法

鲸鱼算法是一种智能优化算法,它是模仿鲸鱼捕食的过程而演化出来的算法,具有原理简单、操作简易、易于实现、需要调整的参数少及鲁棒性强的特点.在函数优化方面,鲸鱼算法的求解精度和稳定性要优于粒子群算法、差分进化算法和遗传算法等.鲸鱼捕食采用的是一种泡泡网捕食的方法,这种捕食方法有以下 3 种表现形式<sup>[20]</sup>:

(1) 包围猎物.

鲸鱼可以识别猎物的位置并将其包围,通过下列方程表现这一过程:

$$\vec{D} = [\vec{C}\vec{X}'(t) - \vec{X}(t)] \quad (9)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}'(t) - \vec{A}\vec{D} \quad (10)$$

式中,  $\vec{A}$ 、 $\vec{C}$  代表系数向量,  $\vec{X}'(t)$  代表当前最优解的位置向量.  $\vec{A}$ 、 $\vec{C}$  的计算方法如下所示.

$$\vec{A} = 2\vec{a} - \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (11)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (12)$$

式中,  $\vec{r}_1$ 、 $\vec{r}_2$  表示  $[0, 1]$  之间的随机向量. 传统  $\vec{a}$  的迭代方法是由 2 线性下降到 0.

(2) 泡泡网攻击.

定义当  $|\vec{A}|$  范围在  $(-1, 1)$  时, 鲸鱼会对猎物发起攻击. 发起攻击是采用螺旋包围的方式, 数学上用以下两种方法表示: (1) 采用逐步向猎物靠近; (2) 是围绕猎物螺旋游动, 两者同时发生, 这个过程由以下数学表达式表示.

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}'(t) - \vec{A}\vec{D}, & p < 0.5 \\ \vec{D}e^{il} \cos 2\pi l + \vec{X}'(t), & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $b$ 、 $l$  为常数.

(3) 搜索猎物.

定义当  $|\vec{A}| \geq 1$  时鲸鱼会远离猎物去寻找其他目标, 这样的目的是为了保证鲸鱼找寻到的猎物是全局最优.

$$\vec{D} = [\vec{C}\vec{X}_s(t) - \vec{X}(t)] \quad (14)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_s(t) - \vec{A}\vec{D} \quad (15)$$

式中,  $\vec{X}_s(t)$  表示一个随机位置向量.

### 3.3 模拟退火算法

模拟退火算法(SA 算法)是一种模拟金属退火的原理而衍生出来的算法, 它以一定的概率接受比当前解差的解, 从而有概率跳出局部最优, 具有

计算过程简单, 通用鲁棒性强的特点. SA 算法的计算过程如下<sup>[14]</sup>.

(1) 初始化: 初始温度  $T$ , 初始解状态  $x$  (迭代起点), 每个温度状态下的迭代次数  $L$ .

(2) 产生新解  $x_{\text{new}} = x + \Delta x$ ,  $\Delta x$  为一个增量范围内的随机数.

(3) 计算增量  $\Delta f = f(x_{\text{new}}) - f(x)$ , 根据实际需求评判  $\Delta f$  是否满足要求, 如果满足要求则以  $x_{\text{new}}$  作为新解, 否则以概率  $p = e^{-\frac{\Delta f}{kT}}$  接受  $x_{\text{new}}$  为新解.

(4) 判断是否达到该温度下的迭代次数, 如果满足迭代次数, 则判断是否满足终止条件, 满足则停止; 如果不满足迭代次数, 则继续迭代, 满足迭代次数但不满足终止条件的话则继续降温. 温度降温过程一般为  $T = \alpha T$ ,  $\alpha$  一般取接近于 1 的值, 如 0.95、0.9 等.

### 3.4 算法改进

结合 SA 算法以及 WOA 算法的优点, 将 SA 算法与 WOA 算法结合保证优化结果是全局最优, 因此采用 SA-WOA 算法对 PID 参数进行整定, 理论上可以达到最优的控制效果. 我们在此基础上对 SA-WOA 算法做如下改进.

(1) 由于 WOA 算法计算较为繁琐, 且迭代次数过多, 为了提高收敛速度, 我们将 WOA 算法中  $\vec{a}$  的下降方式进行改进. 前期由于鲸鱼搜索猎物的范围较大且加入了 SA 算法跳出局部最优, 因此  $\vec{a}$  下降的速度需要加快, 后期则需要减慢下降的速度. 改进后  $\vec{a}$  的下降方式如下所示:

$$\vec{a} = 2 \left( \frac{L - L_{\max}}{L_{\max}} \right)^2 \quad (16)$$

式中,  $L$  表示当前迭代次数;  $L_{\max}$  表示最大迭代次数.

(2) 鲸鱼在进行泡泡网攻击时, 定义螺旋游动以及向猎物靠近两种方式概率相同, 但是在实际中, 鲸鱼在前期搜索范围较大的情况下, 有较大概率围绕目标螺旋游走继续找寻猎物; 在后期距离猎物较近的情况下, 有大概率向猎物靠近. 因此我们将算法进行以下改进.

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}'(t) - \vec{A}\vec{D}, & p < 0.9 - 0.4 \frac{L}{L_{\max}} \\ \vec{D}e^{il} \cos 2\pi l + \vec{X}'(t), & p \geq 0.9 - 0.4 \frac{L}{L_{\max}} \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $L$  表示当前迭代次数;  $L_{\max}$  表示最大迭代



次数.

(3) 模拟退火算法的终止条件通常为温度下降到极低或者误差达到设定需求. 本文综合考虑鲸鱼算法的迭代终止条件, 将终止条件改为迭代次数的达到, 同时对温度的下降过程进行改进, 温度下降需要与迭代次数有关. 考虑反比例函数关系, 改进后的温度下降过程为

$$T = \frac{L_{\max}}{2L} \tag{18}$$

式中,  $L$  表示当前迭代次数;  $L_{\max}$  表示最大迭代次数. 改进后的算法流程图如图 4 所示.

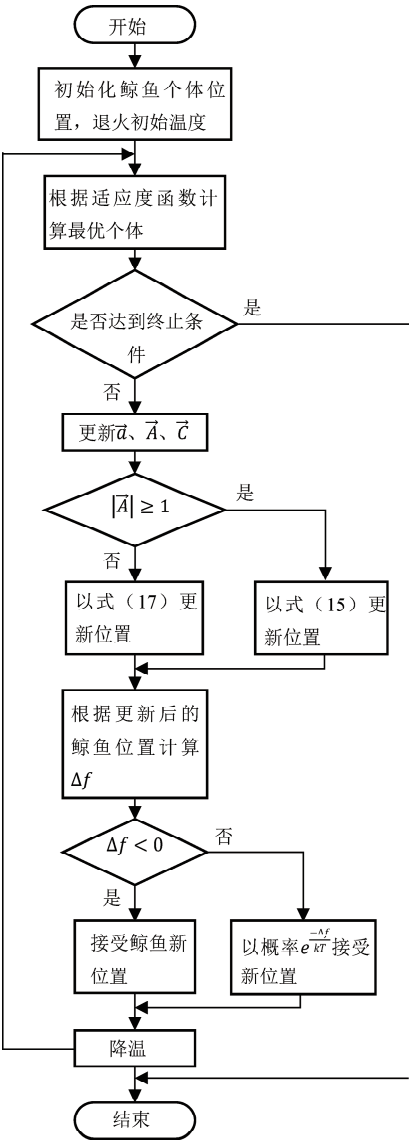


图 4 改进算法流程  
Fig. 4 Improve algorithm flow

改进后的 SA-WOA 算法步骤如下所示.

(1) 根据温度控制系统的约束条件, 初始化鲸鱼种群(数量为  $m$ ), 包括鲸鱼的位置, 以及给定起

始温度  $T_0$ , 迭代次数  $L_{\max}$ .

(2) 根据适应度函数计算每条鲸鱼的适应度值, 并更新最优鲸鱼位置及最优值.

(3) 判断是否满足结束条件, 如满足则输出最优值, 不满足则执行步骤(4).

(4) 更新算法相关参数, 同时判断是否满足  $|\vec{A}| \geq 1$ , 再根据算法的相关公式更新鲸鱼位置.

(5) 根据适应度函数, 计算位置更新后鲸鱼的适应度值, 再与更新前比较计算  $\Delta f$ , 如果  $\Delta f < 0$ , 则接受鲸鱼更新后的位置; 如果  $\Delta f \geq 0$  则以概率  $e^{\frac{-\Delta f}{K T}}$  接受鲸鱼更新后的位置.

(6) 进行降温操作.

(7) 返回步骤(2).

对比文献[14]所用方法, 文献[14]采用模拟退火策略对改进粒子群算法进行优化的原理为: 当改进粒子群算法进入局部最优, 或者达到迭代次数后, 再引入模拟退火算法进行二次优化. 此种算法属于先利用改进粒子群算法进行粗寻优, 再利用模拟退火算法进行精寻优的方式. 本文算法与之不同, 本文算法将模拟退火算法的思想融入鲸鱼算法中, 在鲸鱼算法的每一次迭代中, 都进行一次模拟退火策略的判断. 本文算法可以加快迭代的速度, 减少计算量, 且同时保证结果为全局最优.

4 仿真对比实验分析

利用 MATLAB R2017b 软件进行仿真分析, 将改进的 SA-WOA 算法在软件上编程, 适应度函数考虑温度的总误差以及超调量, 制订适应度函数为

$$J = \sum_{i=0}^n (c_1 \cdot \text{error}(i) + c_2 \cdot u(i)^2) \tag{19}$$

式中,  $c_1$ 、 $c_2$  为权重系数.

制定鲸鱼种群数量为 100, 迭代次数为 100,  $K_P$ 、 $K_I$  和  $K_D$  等 3 个参数的范围依次为  $[0, 10]$ 、 $[0, 10]$ 、 $[0, 10]$ , 系统输入  $u(i)$  的范围为  $[0, 100]$ . 权重系数  $c_1$  为 0.999,  $c_2$  为 0.001. 根据套袋机要求, 封膜温度为 130 ℃.

由于系统延时不论在何种算法优化情况下都是相同的, 因此在进行仿真实验时, 它可以忽略不计. 实验结果如图 5 所示, 系统在 160 s 之后系统达到平衡, 且整个过程中, 系统的超调量为 0. 实验结果表明, 本文算法优化的参数值可以很好地控制系统温度.

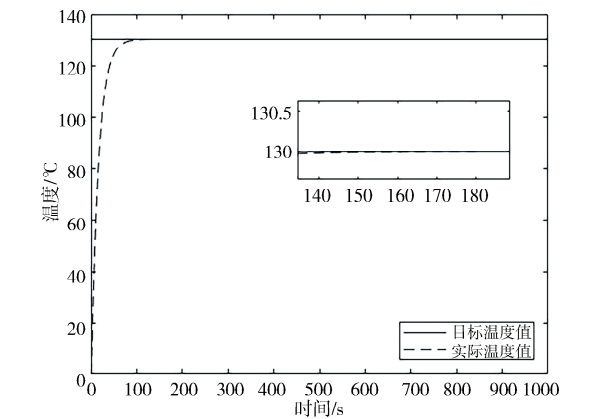


图 5 仿真实验结果曲线  
Fig. 5 Simulation experiment result curve

改进算法的适应度曲线如图 6 所示,我们可以看出,在种群数量为 100 的情况下,算法迭代 7 次就可以求解出最优结果. 算法收敛速度快.

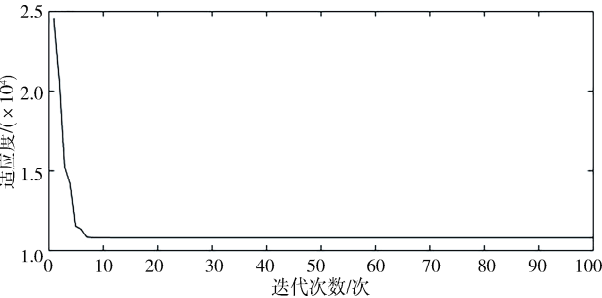


图 6 适应度曲线  
Fig. 6 Fitness curve

为了体现本算法的优势之处,我们将本算法的整定结果与 PLC 中 PID 自整定模块整定结果<sup>[5]</sup>、粒子群算法整定结果<sup>[7]</sup>以及基于模拟退火的改进粒子群算法(SACPSO 算法)的整定结果<sup>[14]</sup>进行比较,同时对这 4 种算法的优化时间进行统计. 4 种算法求解结果如表 1 所示. 通过表 1 我们可以看出,相对于继电反馈算法、粒子群算法以及基于模拟退火的改进粒子群算法,本文改进算法自整定时间最短(155 s),有较大的优势.

表 1 算法求解结果				
Tab. 1 Algorithm solution result				
算法类型	$K_P$	$K_I$	$K_D$	自整定时间/s
继电反馈算法	1. 779	0. 010	3. 500	2058
粒子群算法	3. 247	0. 757	0. 204	537
SACPSO 算法	10. 000	0. 967	4. 339	262
改进 SA-WOA 算法	3. 778	0. 007	0. 001	155

我们将这 4 种算法所求参数分别进行仿真实验,仿真结果对比曲线如图 7 所示. 根据结果我们

可以看出,本文改进算法的超调量为 0 且达到目标温度所用时间最短;粒子群算法优化结果超调量最大且震荡严重;SACPSO 算法优化效果相较于粒子群算法优化效果更好,达到稳定的时间与本文算法基本一致,但是超调量也较大;继电反馈算法优化结果超调量低,但是达到目标温度所需时间过长. 因此本文算法相比于其他 3 种算法具有明显的优势.

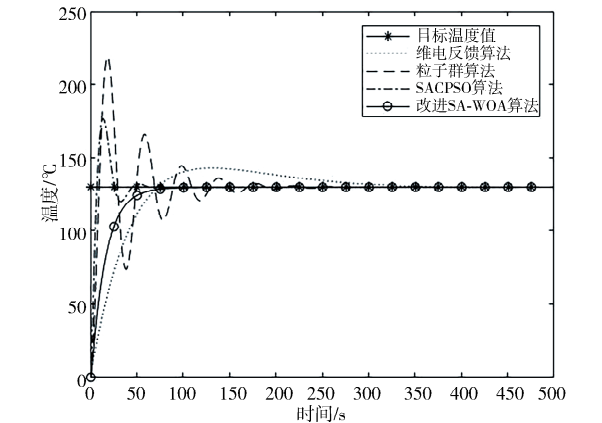


图 7 仿真结果对比曲线  
Fig. 7 Comparison curve of simulation results

5 现场实验

将仿真优化 PID 参数输入 PLC 控制器进行实验,通过网线将 PLC 与上位机连接后,进行通讯,每隔 0.5 s 采集一次温度数据,将采集的温度数据绘制成曲线图,结果如图 8 所示.

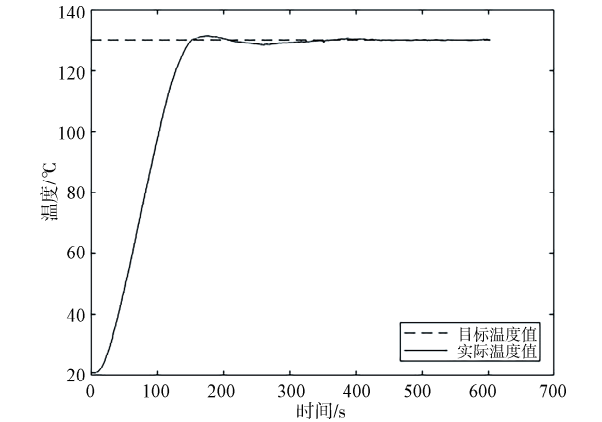


图 8 温度实测数据曲线  
Fig. 8 Temperature measured data curve

从图 8 根据结果可以看出,实测曲线与仿真曲线有差别,可能由两个原因造成:(1) 系统存在大的时滞性,仿真时未考虑;(2) 系统实际的传递函数与 MATLAB ident 工具箱识别的传递函数有差

异,但是温度实测曲线表明系统在140 s左右到达设定温度,在400 s之前温度有一定的偏差,偏差范围在 $[-1.8, +1.2]$ 可以保证较好的热封质量;到400 s之后,温度趋于稳定,由于环境的波动会有微小的抖动,这时热封质量最佳。综上,本文算法优化的PID参数控制效果良好,可以满足TD150套袋机热封刀温度控制要求。

## 6 结 论

本文将鲸鱼算法和模拟退火算法结合并改进,再把改进后的算法在MATLAB R2017b软件上进行仿真对比实验。仿真对比实验结果表明,本文算法通过优化的参数在系统超调量以及稳定时间方面具有较大优势,且本文算法计算速度更快。我们将仿真所得优化参数进行现场实验,结果也表明了本文算法的可靠性以及优越性。综上,本文算法可以实现套袋机PID温度控制参数的自整定,提高温度的控制效果,保证封膜的质量,对套袋机热封刀温度控制有一定的实际意义。

### 参考文献:

- [1] Luan Z, Khonsari M M. Heat transfer analysis in mechanical seals using fin theory [J]. P I Mech Eng J-J Eng, 2007, 221: 717.
- [2] 潘健,张燕飞,张和平.复合包装膜的热封性能判定及影响因素分析[J].包装与食品机械,2020,38: 70.
- [3] 李霞.制袋机温度控制系统的研究[D].武汉:华中科技大学,2005.
- [4] 谭加加,刘鸿宇,黄武,等.PID控制算法综述[J].电子世界,2015(16): 78.
- [5] 韩相争.S7-200 SMART PLC编程技巧与案例[M].北京:化学工业出版社,2017.
- [6] 刘小臣,何卫东,张迎辉,等.改进PSO算法优化交流伺服系统PID参数研究[J].机床与液压,2021,49: 15.
- [7] 田艳兵.基于PSO的自整定PID温度控制研究[J].化工自动化及仪表,2010,37: 31.
- [8] 韩飞,郑明鹏.基于三方竞争机制的反向多目标粒子群优化算法[J].江苏大学学报:自然科学版,2021,42: 685.
- [9] 吴晓燕,刘笃晋.基于樽海鞘群与粒子群混合优化算法的特征选择[J].重庆邮电大学学报:自然科学版,2021,33: 844.
- [10] 常勇,包广清,程思凯,等.基于VMD和KFCM的轴承故障诊断方法优化与研究[J].西南大学学报:自然科学版,2020,42: 146.
- [11] 曾冰,黄凌翔,彭郎军,等.基于鲸鱼群算法的PID独立变桨控制参数整定方法[J].船舶工程,2020,2020: 550.
- [12] 孙二华,胡云冰.基于鲸鱼优化和深度学习的平衡大数据分类算法[J].西南师范大学学报:自然科学版,2021,46: 127.
- [13] 杨真真,方秀男.模拟退火算法及实例应用[J].中国科技信息,2021(15): 65.
- [14] 薛永生,吴立尧.基于模拟退火的改进粒子群算法研究及应用[J].海军航空工程学院学报,2018,33: 248.
- [15] 袁文波,洪波,尤万方,等.S7-PLC基于Modbus/TCP协议通信研究[J].计算机工程与设计,2014,35: 736.
- [16] Endo A, Utsugi H, Suzuki M, *et al.* Heat transfer from surface with different heat transfer coefficients-rectangular and cylindrical models[J]. Heat Transf Res, 1980, 9: 58.
- [17] Su W J, Yang H T, Liu Z W. System identification based on orthogonal polynomial regression analysis method [C]//Proceedings of the 29th Chinese Control Conference. Beijing: IEEE, 2010.
- [18] 胡黄水,赵思远,刘清雪,等.基于动量因子优化学习率的BP神经网络PID参数整定算法[J].吉林大学学报:理学版,2020,58: 1415.
- [19] 邓新阳,李伟,胡春艳,等.旋转直驱阀的双闭环模糊PID控制仿真分析[J].吉林大学学报:理学版,2021,59: 915.
- [20] 张素君,杨文强.基于改进鲸鱼算法的半主动悬架PID控制[J].河南科技学院学报:自然科学版,2021,49: 55.

### 引用本文格式:

中 文:魏上云,马靖,胡晓兵,等.基于改进SA-WOA算法优化热封刀温度控制系统PID参数的研究[J].四川大学学报:自然科学版,2022,59: 043001.

英 文:Wei S Y, Ma J, Hu X B, *et al.* Research on PID parameters optimization of heat sealing knife temperature control system based on improved SA-WOA algorithm [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2022, 59: 043001.